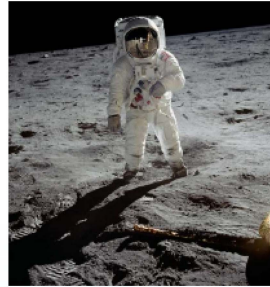


Biomedicina Spaziale: a Call to Action

ASI



Nuove soluzioni ad un vecchio problema: come proteggersi magneticamente dalle radiazioni

Valerio Parisi

Roberto Capuzzo Dolcetta

Fabrizio Frezza

Marco Mastrogiuseppe

Fabio Mangini

Luca Lunati



Fisica Sapienza

Fisica Sapienza

DIET Sapienza

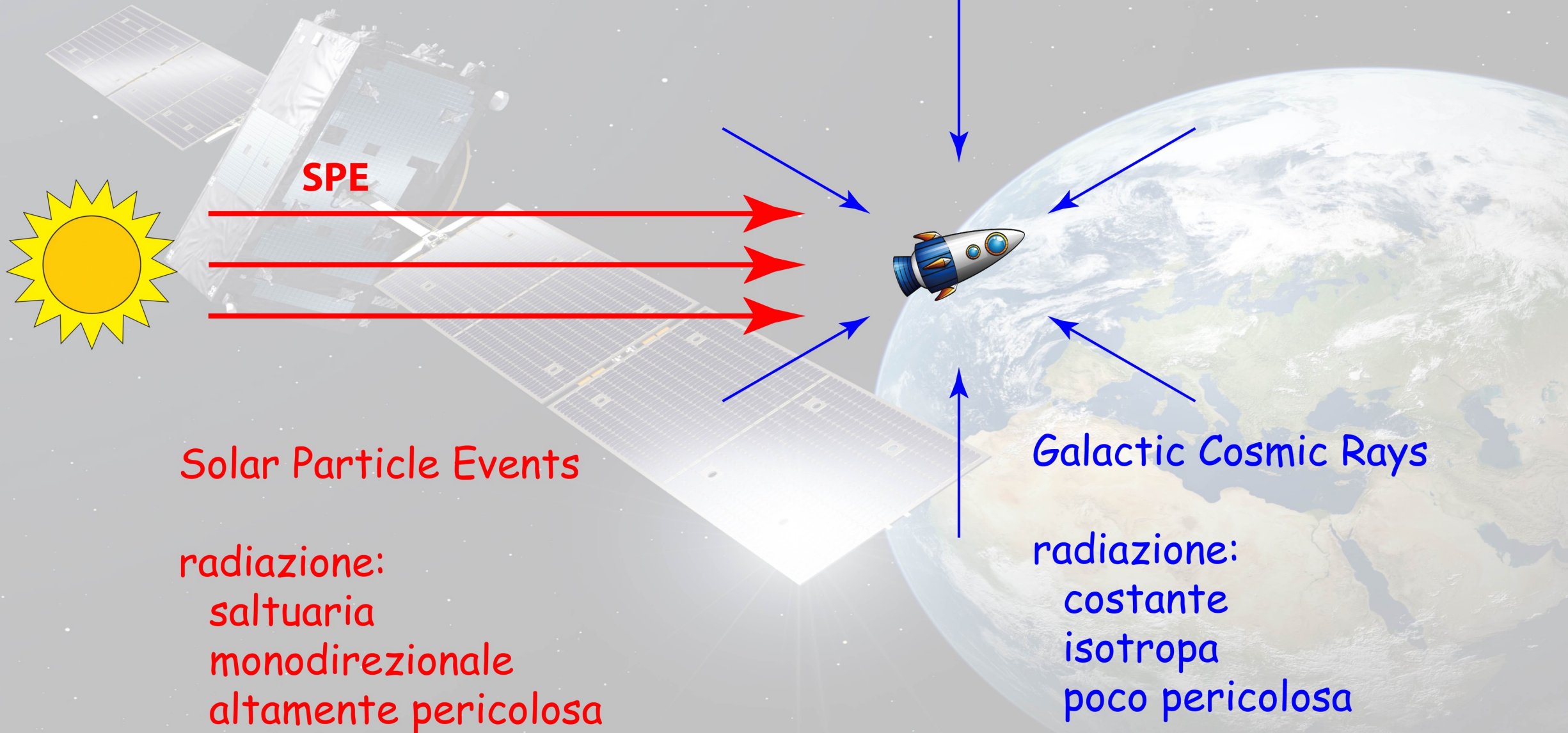
DIET Sapienza

DIET Sapienza

Tor Vergata

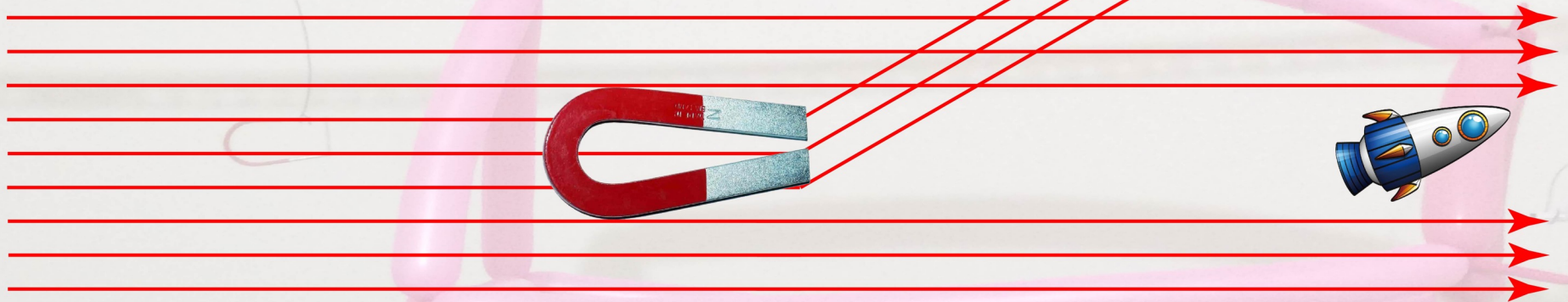
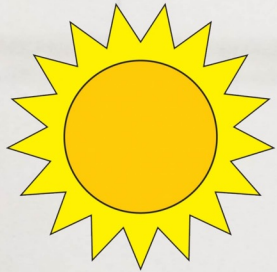


Problema



Soluzione proposta

SPE



Solar Particle Events

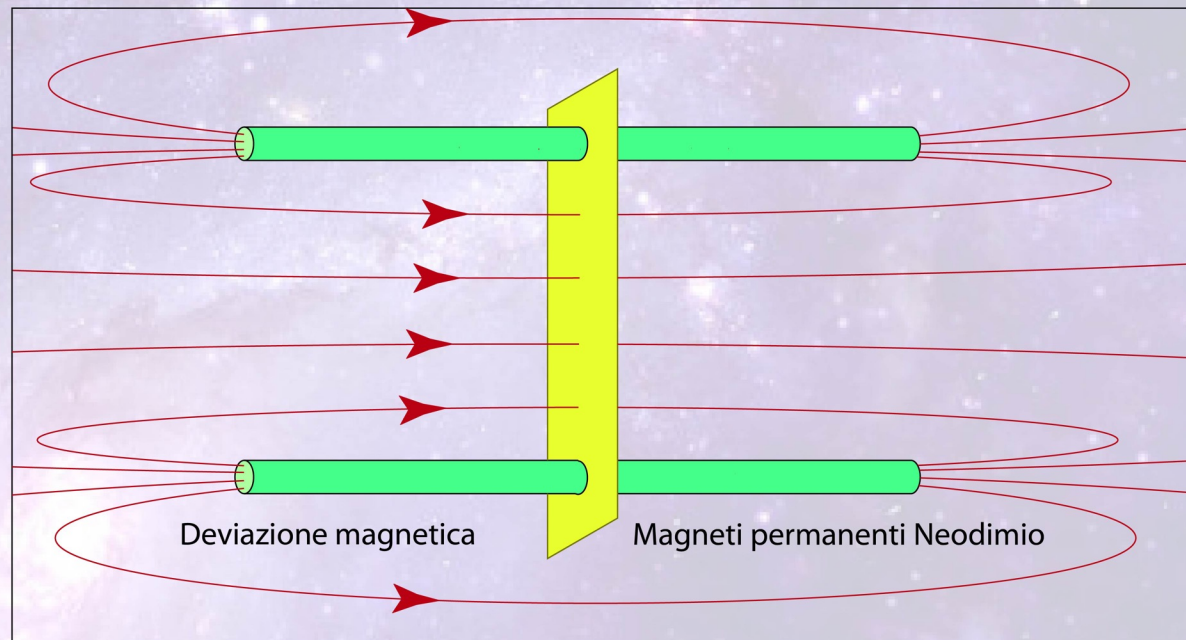
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$



Difesa passiva

Materiale inerte

Una difesa passiva, nel caso più semplice con uno strato di acqua, è sicuramente efficiente ed economica come materiali usati, ma rischia di essere troppo pesante come massa da trasportare se volessimo usare questa protezione per l'intero veicolo



Una difesa con magneti permanenti di Neodimio sicuramente è più complessa e molto più costosa di uno strato di materiale omogeneo ma potrebbe risultare molto più leggera ai fini del trasporto, una volta ottimizzata la disposizione

Radiazione cosmica solare

All'interno dei confini del Sistema Solare, il **Sole** rappresenta la *principale sorgente* di radiazione.

Struttura:

- Nucleo, a combustione nucleare.
- Zone radiative e convettive.
- Fotosfera, la superficie «visibile».

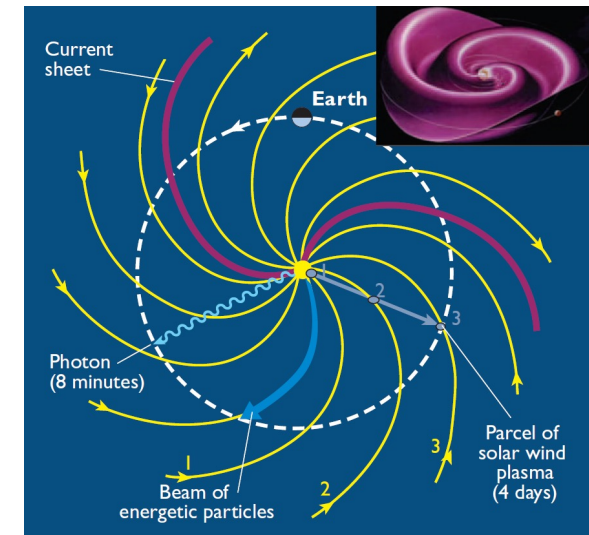
L'*atmosfera solare* si estende verso l'esterno attraverso la *corona*, ed infine nel Sistema Solare come un plasma a bassa densità, il **vento solare**:

- costituito perlopiù di *protoni, elettroni e particelle α* .
- la densità protonica ad 1 AU pari a $\sim 7 \text{ cm}^{-3}$.
- ad 1 AU, le particelle hanno energie di $0.5 - 2 \text{ keV nuc}^{-1}$ e velocità dell'ordine di $300 - 900 \text{ km s}^{-1}$ (slow solar wind & fast solar wind), con intensità che variano fra circa 10^{10} e $10^{12} \text{ particelle cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

Su scala globale, il Sole ha un **campo magnetico dipolare** con un'intensità, misurata sulla superficie, di $\sim 1000 \mu T$ (10 G). Il campo magnetico inverte la propria polarità ogni 11 anni, ripristinando l'orientamento originario dopo aver compiuto un **ciclo ventiduenale di Hale**.

- Il vento solare, che si espande radialmente dal Sole a velocità supersoniche, ‘soffia’ nella nube interstellare circostante un’estesa cavità, l’**eliosfera**, trasportando all’interno di essa materiale e campo magnetico solari.
- Alla distanza dell’orbita terrestre, l’intensità del **campo magnetico interplanetario (IMF)**, anche definito campo magnetico eliosferico (HMF), è pari a $\sim 5 \text{ nT}$ ($50 \mu\text{G}$) e *decresce all’aumentare della distanza eliocentrica*.
- Nel piano su cui giace il Sistema Solare, l’IMF assume la forma di una *spirale archimedeana* (spirale di Parker) a causa della *rotazione differenziale* del Sole (che si compie in un periodo di 27 giorni), e della *propagazione* del vento solare.
- Le linee di campo a mo’ di spirale influenzano le traiettorie di particelle cariche, sprigionate dall’atmosfera del Sole sotto forma di vento solare o di **particelle solari energetiche (SEP)**.

Campo magnetico interplanetario (IMF), generato dal Sole e deformato dagli effetti combinati della rotazione e del vento solari (spirale di Parker). Le correnti eliosferiche diffuse (in magenta), con la tipica forma a «gonna di ballerina», separa le linee di forza aperte del campo magnetico solare di polarità opposta.



- La luminosità del Sole varia con una periodicità regolare di circa 11 anni, indicata come *ciclo solare*, che è accoppiata alle inversioni del campo magnetico.
- In corrispondenza di un **massimo** dell'attività solare, si osserva un incremento nel flusso di particelle costituenti il vento solare il quale, propagandosi, porta con sé correnti e campi magnetici eliosferici intensificati. Ciò comporta una deviazione più efficiente dei RC e dunque una diminuzione nel flusso dei GCRs di bassa energia.
- Durante le fasi di massimo, la superficie del Sole è più dinamica in termini di **trasporto di massa** e di **riarrangiamento del campo magnetico**, come testimoniato dalla comparsa di *macchie solari* ed *espulsioni di massa* che provocano fenomeni particellari intensi.

Il Sole è una **sorgente sporadica** di *nuclei* ed *elettroni* di **raggi cosmici**, accelerati dalle onde d'urto che si propagano attraverso la corona solare e dall'energia magnetica rilasciata nei brillamenti. In occorrenze simili, l'intensità delle particelle energetiche nel mezzo interplanetario può aumentare di un fattore $10^2 - 10^6$ per ore o giorni.

Tali eventi di **particelle solari energetiche (SEP, Solar Energetic Particles)** si verificano con maggiore frequenza durante la fase attiva del ciclo solare: la *massima energia* raggiunta è tipicamente di 10 – 100 *MeV*, sebbene shock associati ad espulsioni di massa coronale (CME) possano accelerare particelle fino ad energie di 20 *GeV*.

- Le SEP consistono principalmente di *protoni*, *elettroni* e *particelle α* , con percentuali ridotte di nuclei di *He-3* e *ioni più pesanti* fino al ferro (HZE).
- I protoni e gli ioni possono essere accelerati fino a qualche decina o centinaia di MeV/n; l'accelerazione elettronica è invece limitata ad energie di qualche MeV.
- Evidenze sperimentali dimostrano che l'onda d'urto sostenuta da una CME rappresenti con tutta probabilità un sito di accelerazione per particelle → ne consegue che le SEP derivino sostanzialmente da **brillamenti solari** o da onde d'urto associate a **CME**.

Gli **eventi di protoni solari (SPE, Solar Proton Events)**, un sottogruppo delle SEP, rappresentano una grave minaccia per i viaggi interplanetari.

- La soglia di un evento protonico solare, per la quale le particelle possono penetrare attraverso una tuta spaziale, è di $10 \text{ protoni cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ ad energie $\geq 10 \text{ MeV}$; questo è anche il valore di soglia che viene monitorato dal SEC (Space Environment Center, USA) per 'predire' l'insorgere di uno SPE.
- Dall'analisi delle concentrazioni di nitrati nelle carote di ghiaccio artico è stato possibile identificare alcuni dei maggiori eventi di SPE avvenuti nell'arco temporale compreso fra il 1561 ed il 1950.
- Il più grande evento di protoni solari, associato al brillamento in luce bianca noto come **evento di Carrington** del 1859, ha fatto registrare una fluenza (omnidirezionale) di $18 - 36 \times 10^9 \text{ protoni cm}^{-2}$ ad energie $> 30 \text{ MeV}$, un valore 4-8 volte superiore a quello relativo all'evento dell'Agosto 1972 che viene solitamente considerato il peggior caso di SPE.

Gli eventi di SEP possono essere suddivisi in due categorie: ***impulsivi*** (*brillamenti impulsivi*) e ***graduali*** (*espulsioni di massa coronale*).

Eventi impulsivi:

- Breve durata (poche ore)
- Ricchi di elettroni
- Forte correlazione con brillamenti impulsivi in H- α e nei raggi X, e con lampi radio di tipo III
- Hanno origine negli strati inferiori dell'atmosfera solare dove le particelle sono accelerate dalle interazioni con i gradienti dei campi magnetici, che si originano nelle macchie solari o da altri moti convettivi del plasma
- Gli ioni hanno un elevato stato di carica (ciò confermerebbe la provenienza dai brillamenti)
- Ridotta dipendenza angolare, limitata entro una fascia di 30 gradi di longitudine

Eventi gradual:

- Durata di diversi giorni
- Ricchi di protoni
- In media hanno la stessa composizione elementare e gli stessi stati di ionizzazione del plasma presente nell'alta corona e nel vento solare
- Associati a brillamenti gradual nei raggi X ed emissioni radio di tipo II e IV
- Prodotti dagli shock sostenuti da intense espulsioni di massa coronale (CME)
- Osservabili su un ampio intervallo di eliolongitudini, in taluni casi di oltre 180 gradi

Le principali caratteristiche degli eventi impulsivi e graduali sono riassunte nella tabella seguente:

Tabella 1.1. Proprietà degli eventi impulsivi e graduali

Proprietà	Eventi impulsivi	Eventi graduali
Particelle	Elettroni	Protoni
He-3/He-4	~ 1	~ 0.0005
Fe/O	~ 1	~ 0.1
H/He	~ 10	~ 100
Q_{Fe} (stato di ionizzazione medio)	~ 20	~ 14
Durata	Ore	Giorni
Tempo di arrivo (1 AU)	$\sim 8\text{--}80$ min	Ore/Giorni
Rischio da radiazioni	Basso	Alto
Eventi/anno	$\sim 1,000$	~ 10